

## CFA/VISHNO 2016

**Estimation du profil de dégradation du marbre de Carrare par transformée Slant-Stack**

M. El Boudani<sup>a</sup>, L. Martinez<sup>a</sup>, N. Wilkie Chancellier<sup>a</sup>, R. Hebert<sup>b</sup>, O. Rolland<sup>c</sup>, S. Forst<sup>c</sup>, V. Vergès Belmin<sup>d</sup> et S. Serfaty<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Laboratoire SATIE (UMR CNRS 8029), Université de Cergy Pontoise Mail Gay Lussac, 95031 Neuville Sur Oise, France

<sup>b</sup>Laboratoire GEC (EA 4506), Université de Cergy Pontoise Mail Gay Lussac, 95031 Neuville Sur Oise, France

<sup>c</sup>Etablissement Public du Château de Versailles, RP834, 78008 Versailles, France

<sup>d</sup>Laboratoire LRMH (USR 3224), 29 rue de Paris, 77420 Champs Sur Marne, France  
loic.martinez@u-cergy.fr



LE MANS

La caractérisation du marbre statuaire par ondes acoustiques volumiques est une méthode non destructive répandue pour le suivi sanitaire des pierres in situ. L'objectif est ici de proposer une étude expérimentale d'échantillons de marbre sain et altéré artificiellement. Un protocole de vieillissement artificiel a été développé pour simuler la dégradation de la surface du marbre : il est basé sur des cycles thermiques de chauffage / refroidissement sur une seule des faces. Une onde de Rayleigh est générée par un transducteur de contact de fréquence centrale de 1 MHz. Les échantillons sont caractérisés en suivant la propagation de l'onde par vibrométrie laser. Afin de déterminer un profil de dégradation en profondeur de ces échantillons de marbre, l'extraction des vitesses de propagation de l'onde de Rayleigh est réalisée au moyen de l'analyse de Slant Stack. Cette transformée a déjà montré son efficacité dans le domaine de la géophysique pour une meilleure analyse des phénomènes de réflexion / réfraction. Les résultats obtenus montrent le comportement vibratoire homogène du marbre sain et font ressortir trois profondeurs d'endommagement pour le marbre altéré. L'extraction de paramètres pertinents par cette analyse est prometteuse pour la caractérisation du marbre et le suivi de son altération superficielle.

### 1 Introduction

La transformée de Slant Stack est une transformée utilisée en géophysique pour analyser les champs acoustiques réfléchis et réfractés par les différentes couches de matériaux du sous-sol [1]. Elle est ici appliquée à l'estimation de la dispersion des ondes de surface (Rayleigh et Love) pour des applications en contrôle non destructif [2,3] et l'évaluation des ondes guidées de Lamb [4].

### 2 Théorie et simulation numérique

Pour une onde non dispersive non atténuée, de vitesse de phase  $V_{phi}$ , générée par une impulsion, la forme d'onde originelle  $s(t)$  est simplement translatée dans l'espace-temps. Un signal  $y(t, x)$  reçu par un récepteur à une distance  $x$  (Fig. 1), peut s'écrire:

$$y(t, x) = s(t) * \delta(t - \frac{1}{V_{\phi}} x) = s(t - \frac{1}{V_{\phi}} x) \quad (1)$$

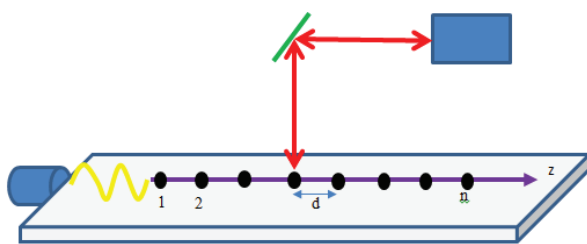


Figure 1: Réseau linéaire de détection de l'onde acoustique.

Les signaux simulés (Fig. 2) montrent que la ligne de crête de  $y(t, x)$  suit alors une droite de pente  $V_{phi}$ . Pour des signaux collectés correspondant à une onde de vitesse inconnue que l'on souhaiterait estimer, la transformée de Slant Stack (SIS) est un estimateur intéressant si l'on dispose de peu d'échantillons spatiaux [3].

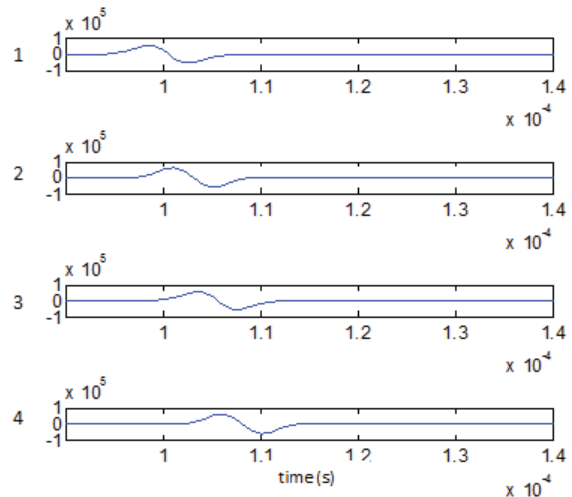


Figure 2: Signaux simulés pour n=4

La transformée SIS (Fig. 3) donne une représentation dans le plan Vitesse de Phase-Retard SIS( $V_p, t$ ) de  $y(t, x)$  maximum pour  $V_{phi}=1000\text{m/s}$ , la vitesse utilisée pour la simulation et  $t=10\mu\text{s}$  correspondant à l'instant du premier échantillon. La transformée de Fourier temporelle [5] SIS donne accès aux courbes de dispersion en fonction de la fréquence (Fig. 4)

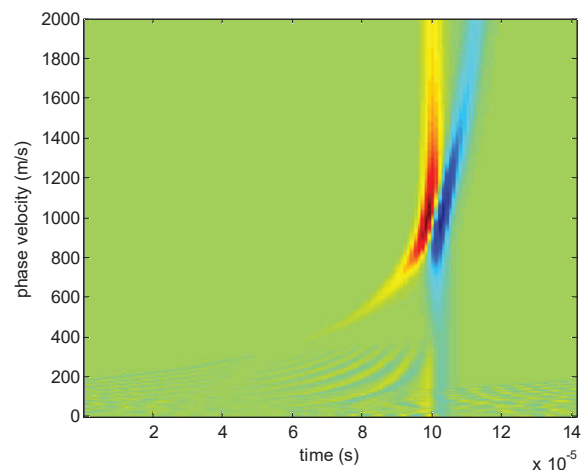


Figure 3: La transformée de Slant Stack dans le domaine temporel des signaux simulés.

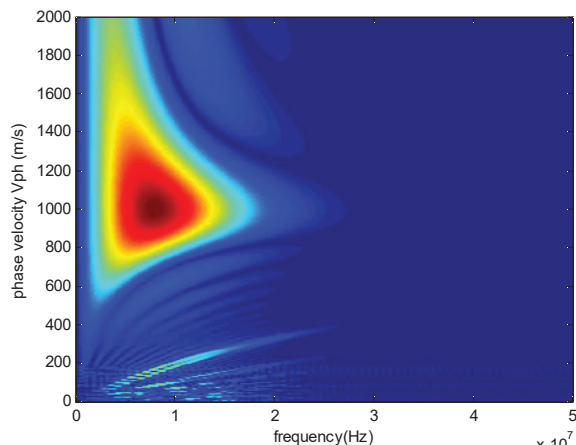


Figure 4: La transformée de Slant Stack dans le domaine fréquentiel des signaux simulés.

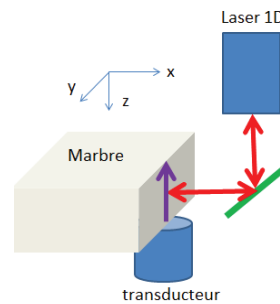


Figure 5: Dispositif expérimental.

### 3.3 Echantillon sain

On visualise sur la Fig. 6 l'onde de Rayleigh qui se propage sans atténuation le long de l'épaisseur de l'échantillon sain A. Elle se réfléchit quand elle atteint le bord de la plaque.

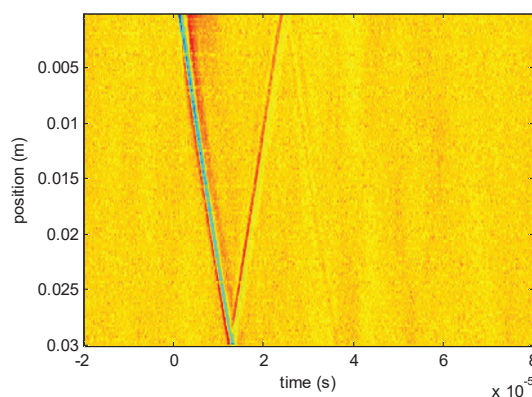


Figure 6: Vibrations de l'onde de Rayleigh de l'échantillon sain (A).

En utilisant la transformée de Slant Stack dans le domaine temporel ou fréquentiel, on extrait la vitesse de Rayleigh expérimentale de l'échantillon sain, égale à 2700m/s.

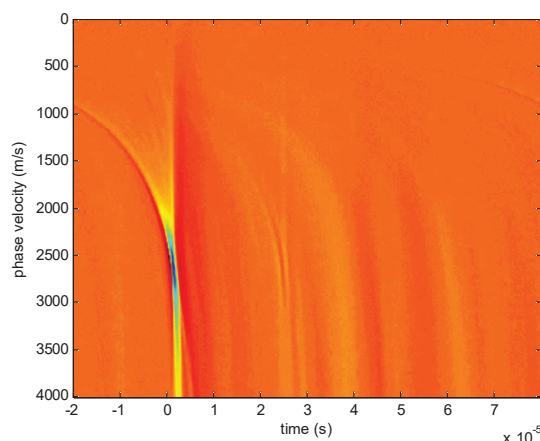


Figure 7: La transformée de Slant Stack dans le domaine temporel de l'échantillon sain (A).

## 3 Résultats expérimentaux

### 3.1 Echantillons analysés

Pour illustrer l'utilisation de la transformée de Slant Stack dans le suivi de la dégradation des matériaux du patrimoine, une étude sur du marbre du Carrare a été effectuée. Le marbre examiné provient du statuaire du Parc du Château de Versailles. Les échantillons ont été coupés en parallélépipèdes rectangle de dimensions  $(10 \times 10 \times 3 \text{ cm}^3)$ . Deux échantillons A et B ont été préparés.

L'échantillon A est conservé intact tandis que l'échantillon B a subi un protocole de vieillissement artificiel pour reproduire une des pathologies rencontrées dans les statues du Parc du Château de Versailles (Désintégration saccharoïde). Ce protocole consiste à imposer des différences Elle a été soumise au cycle suivant dans l'air ambiant :

- 1 h de mise en température sur une plaque chauffante,
- 1/2 h de refroidissement via la mise en contact avec des glaçons.

L'échantillon B a été chauffé à des températures différentes (100, 200, 300 et 450°C) successivement pendant 25 cycles chacune.

### 3.2 Banc instrumental

Le banc de mesures vibrométriques (Fig.5) est constitué des appareils suivants : un vibromètre laser 1D, un oscilloscope, un générateur de signaux impulsionnels, des platines de translation et de leur commande, un transducteur ultrasonore de cisaillement de fréquence centrale de 1MHz et un poste de contrôle. Ainsi, ce banc instrumental laser permet de réaliser des mesures ponctuelles, sans contact et a pour but de suivre la propagation des ondes afin de réaliser un contrôle non destructif des échantillons.

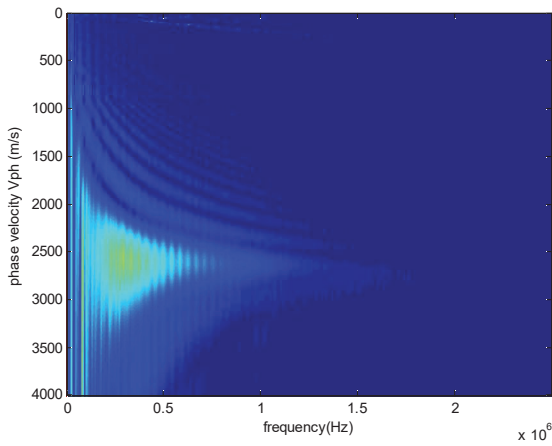


Figure 8: La transformée de Slant Stack dans le domaine fréquentiel de l'échantillon sain (A).

### 3.4 Echantillon altéré

Dans l'échantillon altéré, l'onde de Rayleigh est atténuée sans pouvoir arriver au bord de la plaque, d'où l'absence du phénomène de réflexion observé dans la plaque saine (Fig.9). Un comportement dispersif de l'onde de Rayleigh apparaît également et on peut distinguer trois zones avec 3 pentes différentes correspondant a priori à des vitesses différentes, donc à un degré d'altération non homogène le long de l'épaisseur.

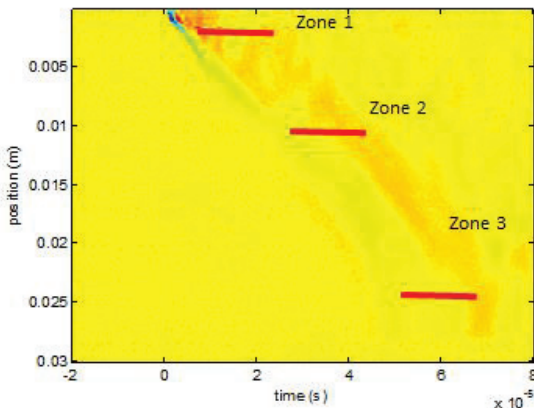


Figure 9: Vibrations de l'onde de Rayleigh de l'échantillon altéré (B).

La figure 10 représente l'analyse de Slant Stack correspondante dans le domaine temporel.

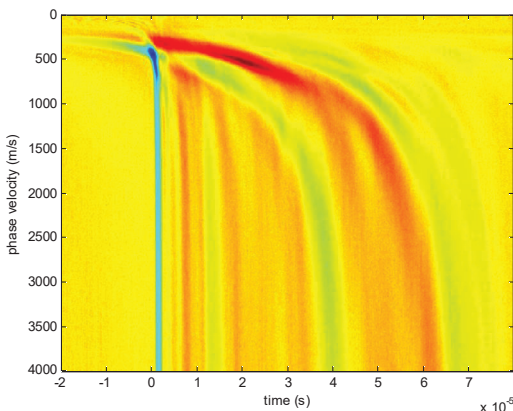


Figure 10: La transformée de Slant Stack dans le domaine temporel de l'échantillon altéré (B).

La figure (11) confirme l'hypothèse de la non-homogénéité de l'altération d'épaisseur provoquée par le protocole de vieillissement artificiel. Le phénomène de réflexion de l'onde au bord de la zone étudiée est plus présent dans la zone 3 (Fig 11.c). Ceci est compréhensible puisque cette zone 3 est la moins altérée car située dans le cœur du matériau, la zone 1 (Fig. 11.a) étant celle qui a subi directement les chocs thermiques.

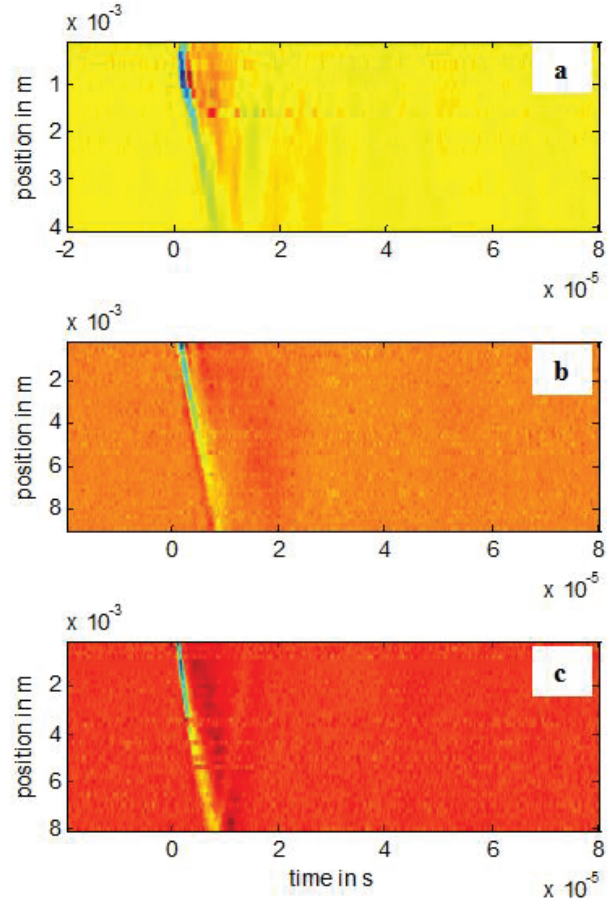


Figure 11: Vibrations de l'onde de Rayleigh dans les 3 zones de l'échantillon altéré (B) : zone1(a), zone 2(b) et zone 3 (c).

Ces différents comportements vibratoires sont confirmés par l'analyse des signaux via la transformée de Slant Stack (Fig. 12). En effet, les vitesses de propagation de l'onde de Rayleigh peuvent être extraites : 500 m.s<sup>-1</sup> pour la zone a, 1100 m.s<sup>-1</sup> pour la zone b, 1400 m.s<sup>-1</sup> pour la zone c.

Une variation de la bande passante fréquentielle est observée (Fig.13 b et 13 c) de la zone 2 et 3 de la plaque altérée. Cette variation se traduit par une baisse de la fréquence centrale. Pour la zone 1, la plus altérée (Fig 13.a), l'atténuation des vibrations ne nous permettent pas pour l'instant d'extraire d'information exploitable.

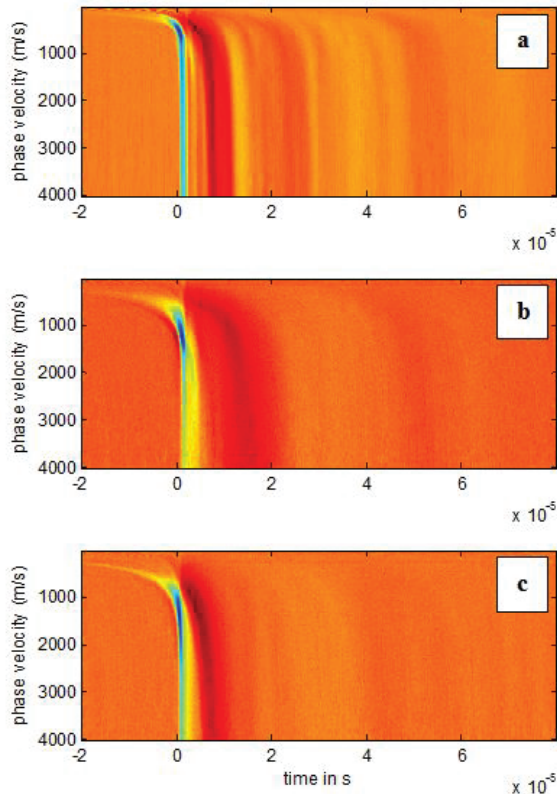


Figure 12: La transformée de Slant Stack dans le domaine temporel des 3 zones de l'échantillon altérée B : zone1(a), zone 2(b) et zone 3 (c).

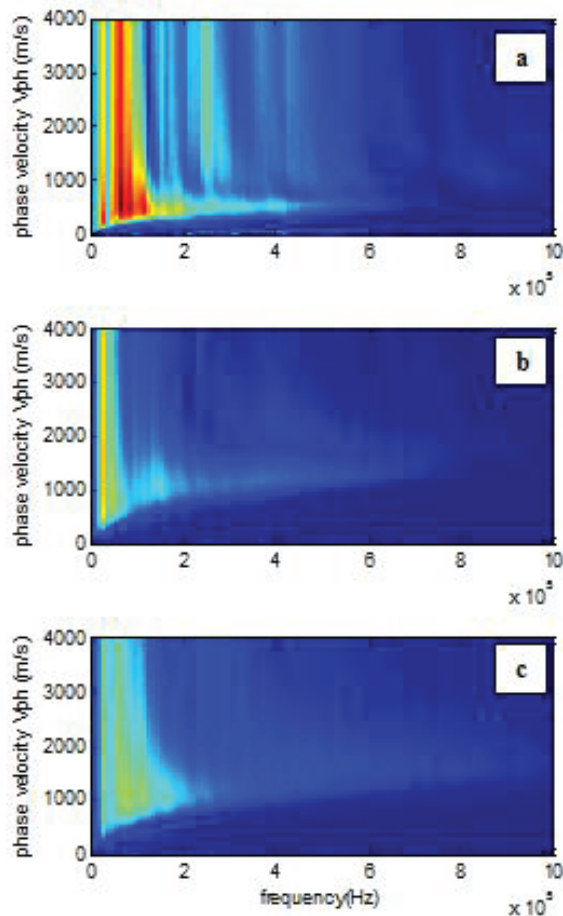


Figure 13: La transformée de Slant Stack dans le domaine fréquentiel des 3 zones de l'échantillon altérée B : zone1(a), zone 2(b) et zone 3 (c).

## 5 Conclusion

La transformée de Slant Stack a été utilisée dans le but de démontrer la non-homogénéité en épaisseur des échantillons altérés artificiellement, et de déterminer par la suite l'épaisseur de chaque couche de degré de dégradation différent. Cette méthode présente un intérêt dans l'étude de l'état de surface des statues de la statuaire du parc du Château de Versailles.

Mis en œuvre dans le domaine de géoscience en particulier [6], l'utilisation d'un plan de représentation (fréquence, vitesse de phase) par la transformée de Slant Stack est complémentaire du plan classique (fréquence, nombre d'onde).

## Remerciements

Ces travaux sont financés par la Fondation des Sciences du Patrimoine, LabEx Patrima.

## Références

- [1] G.A. McMechan, M.J. Yedlin, Analysis of dispersive waves by wave field transformation, *Geophysics* 46(6), 869-874 (1981).
- [2] F. Soltani, M. Goueygou, Z. Lafhaj, B. Piwakowski, Relationship between ultrasonic Rayleigh wave propagation and capillary porosity in cement paste with variable water content, *NDT&EInt* 54, 75-83 (2013).
- [3] L. Ambrozinski, B. Piwakowski, T. Stepinski, T. Uhl, Evaluation of dispersion characteristics of multimodal guided waves using slant stack transform, *NDT&E International* 68,88-97 (2014).
- [4] S.X. Zhang, L.S. Chan, J. Xia, The Selection of Field Acquisition Parameters for Dispersion Images from Multichannel Surface Wave Data, *Pure Appl Geophys* 161,185-201 (2004).
- [5] D. Allyene, P. Cawley. *J Acoust Soc Am* 89, 1159-1168 (1991).
- [6] Y. Gu, M. Sacchi. *Surv Geophys* 30, 327-354 (2009).